

杨进忠, 李名川, 李宏璧, 等. 锦屏地下实验室防水抑氡工程技术与应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 155-168. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.013

YANG Jinzhong, LI Mingchuan, LI Hongbi, et al. Waterproof and Radon suppression engineering technology and application at China Jinping underground laboratory [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 155-168. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.013

锦屏地下实验室防水抑氡工程技术与应用

杨进忠¹, 李名川¹, 李宏璧¹, 朱文哲¹, 张泽天²

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】氡是一种惰性气体, 由地下洞室岩体不断析出并衰变, 严重干扰深地实验室中以暗物质研究为代表的前沿物理实验探测, 危害实验人员健康。为降低实验空间氡含量, 保持洞内环境干燥, 【方法】中国锦屏地下实验室二期开创性地建造了一种特殊且轻薄的防水抑氡结构, 将周围岩体渗出的氡和地下水均隔绝抑制在实验空间外, 同时减少外用材料引入额外的辐射本底。率先开展了锦屏地下实验室不同防护结构和通风环境下空间空气氡浓度原位探测。【结果】结果显示: 在通风良好的情况下, 自研防水抑氡结构成功实现了平均空气氡浓度 11.1 Bq/m^3 的极低氡含量的洁净空气环境; 在没有新风系统的情况下, 防水抑氡结构使室内氡含量降低至与原洞室条件相似洞室的 18.75%; 防水抑氡结构施工完成一年后, 实验室内氡气浓度基本不变, 同时保持了洞室内部全寿命周期无渗漏。【结论】结果表明: 自研防水抑氡结构能够大幅降低室内氡气浓度, 并保持室内氡气浓度不变且无渗漏, 为全球地下实验室防水抑氡环境构建提供了新方法和新技术。

关键词: 防水抑氡; 低辐射本底; 中国锦屏地下实验室; 室内氡测量; 影响因素; 地下水; 地下洞室

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X591

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0155-14



Waterproof and radon suppression engineering technology and application at China Jinping underground laboratory

YANG Jinzhong¹, LI Mingchuan¹, LI Hongbi¹, ZHU Wenzhe¹, ZHANG Zetian²

(1. Yalong River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] Radon, an inert gas continuously exuded and decayed from the surrounding rock of underground chambers, is seriously interfered with cutting-edge physical experiments, such as dark matter research in deep underground

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2024-12-07; 录用日期: 2024-12-09; 网络出版日期: 2024-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B20146)

作者简介: 杨进忠(1982—), 男, 高级工程师, 雅砻江流域水电开发有限公司锦屏地下实验室管理局工程技术部主任, 硕士, 主要从事水利水电工程和深地实验室建设管理。E-mail: yangjinzhong@sdic.com.cn

通信作者: 李名川(1981—), 男, 正高级工程师, 雅砻江流域水电开发有限公司锦屏地下实验室管理局局长, 硕士, 主要从事水利水电工程和深地实验室建设管理。E-mail: limingchuan@sdic.com.cn

张泽天(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事深部岩体渗流力学、原位探测及多场耦合机理方面的基础科学研究。E-mail: zhangzetian@scu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

laboratories, and poses health hazards to experimental personnel. To reduce radon levels in the experimental space and maintain the dryness of the chamber environment, [Methods] a special lightweight waterproof radon-suppressing structure was innovatively constructed in Phase II of the China Jinping Underground Laboratory. This structure was designed to isolate radon and groundwater exuded from the surrounding rock outside the experimental space while minimizing additional radiation background introduced by external materials. Measurements of air radon concentration under different protective structures and ventilation conditions were conducted in situ. [Results] It was shown that, under good ventilation conditions, an ultralow radon concentration of 11.1 Bq/m^3 was achieved with the self-developed waterproof radon-suppressing structure, creating a clean air environment. Without a fresh air system, radon concentrations were reduced to 18.75% of the level in a chamber with conditions similar to the original chamber. One year after the construction of the waterproof radon-suppressing structure, radon concentrations in the laboratory remained stable, and no leakage was observed throughout the lifecycle of the chamber. [Conclusion] The self-developed waterproof radon-suppressing structure was demonstrated to significantly reduce radon concentration in indoor environments, maintain stable radon levels without leakage, and provide a novel method and technology for constructing waterproof and radon-suppressing environments in underground laboratories worldwide.

Keywords: waterproof and radon suppression; low radiation background; China Jinping underground laboratory; Indoor radon measurement; influencing factors; groundwater; underground cavity

0 引言

中国锦屏地下实验室位于四川凉山锦屏水电站锦屏山隧道中部, 上部岩石覆盖厚度逾 2 400 m。锦屏地下实验室一期于 2010 年 12 月建成并启用, 科研成果丰硕, 为了扩大实验规模, 锦屏地下实验室二期于 2014 年 8 月在实验室一期以西 0.6 km 左右启动建设。实验室二期包括 8 个 $65 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高) 的主实验厅, 2 个岩土实验厅、2 条辅助隧道、4 条服务隧道、3 条连接隧道等, 总容积约 30 万 m^3 , 其布局如图 1 所示。主要开展暗物质、中微子、核天体物理、地球科学、深地岩体力学、深地医学等前沿基础科学研究, 是我国首个极深地下实验室, 也是目前国际上空间最大、埋深最深、宇宙线通量最少、辐射本底最低、交通最便利、综合保障条件最好的地下

实验室, 其建设和发展对我国基础前沿和应用研究都具有重要科学意义^[1]。

锦屏地下实验室作为世界上最大、最深的实验室, 实验室内部进行的暗物质、中微子、核天体物理等实验需要极低的环境背景辐射, 这对实验室的本底辐射提出了极高的要求。虽然巨厚岩石覆盖层可以屏蔽大量的宇宙射线, 但在地下实验室周围环境中还存在其他放射性物质, 如岩石中往往含有少量铀和钍元素, 会衰变产生氡, 并随着断裂带、裂隙等扩散渗入地下实验空间, 导致辐射本底升高; 氡衰变产生的子体会粘附在空气中悬浮的颗粒物上, 扩散到实验设备和实验室建筑表面, 形成额外的辐射本底^[2]。此外, 实验室建材也会析出氡^[3-4], 对地下实验室各类灵敏实验造成极大干扰^[5-6]。

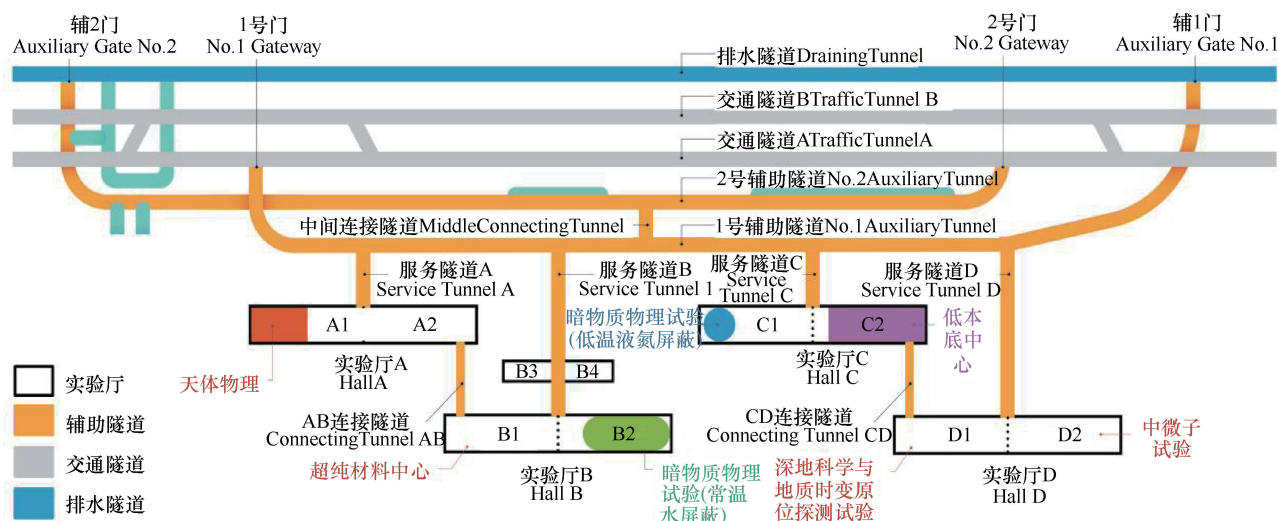


图 1 锦屏地下实验室二期布局示意

Fig. 1 Layout diagram of underground laboratory in Jinping II

通常所称的氡放射性元素是指²²²Rn, 半衰期为3.8 d, 易在室内积累, 其衰变产物会危害人体健康^[7-9], 因此需要控制室内氡含量^[10]。为保护人体健康, 国家出台了室内氡及其子体控制规范, 但对于环境较为密封的深地洞室, 氡气控制要求则更为严格^[11]。通常来说, 通风降氡是最常用最直接的降氡方式, 主要实现氡气的“稀释”^[12], 但不能满足地下实验室前沿物理实验探测的环境本底要求。国际上地下实验室主要通过选择自然氡浓度较低的场所、加强通风、采取氡屏蔽措施等方法进行降氡^[13]。锦屏地下实验室新风自10 km外锦屏山脚雅砻江畔加压引入, 通风量有限且运行成本高。与此同时, 锦屏地下实验室上覆岩体厚、地下水位高、渗透水压大, 渗水多顺岩层出露, 多以线状流水呈现, 局点有小股涌水, 岩层较厚区域, 也有渗滴水现象, 需要洞室施作结构具有一定的防水功能以保持洞室环境的干燥, 在阻止水体进入实验室空间同时, 防止空气湿度过大影响设备寿命。

鉴于此, 锦屏地下实验室二期在洞壁表层开创性

建造了一种特殊且轻薄的防水抑氡结构, 既屏蔽了周围岩体逸出的氡气, 又通过使用低本底材料和减少建材用量降低了建材带来的额外辐射本底, 且具有较好的防水效果。通过实地测量对比分析, 实验空间防水抑氡综合防治成效显著。

1 洞室基本情况

1.1 工程地质条件

锦屏地下实验室二期工程所在区域发育有一背斜构造, 轴向近南北走向。从核部往两翼岩层产状特征为: 走向均为近SN—NNE, 北西翼倾向NW, 南东翼倾向SE。其北西翼覆盖有A1、A2、B1实验厅, 南东翼覆盖有B2、C1、C2、D1和D2实验厅, 核部覆盖有服务隧道B, 且倾向与服务隧道B轴线方向相近。在A2、B1、B2实验厅所在区域发育有两条断裂构造, 整体上错切背斜构造, 最宽处1 m左右。背斜构造和两条断裂构造是锦屏地下实验室二期的主要构造格局^[14-15], 如图2所示。

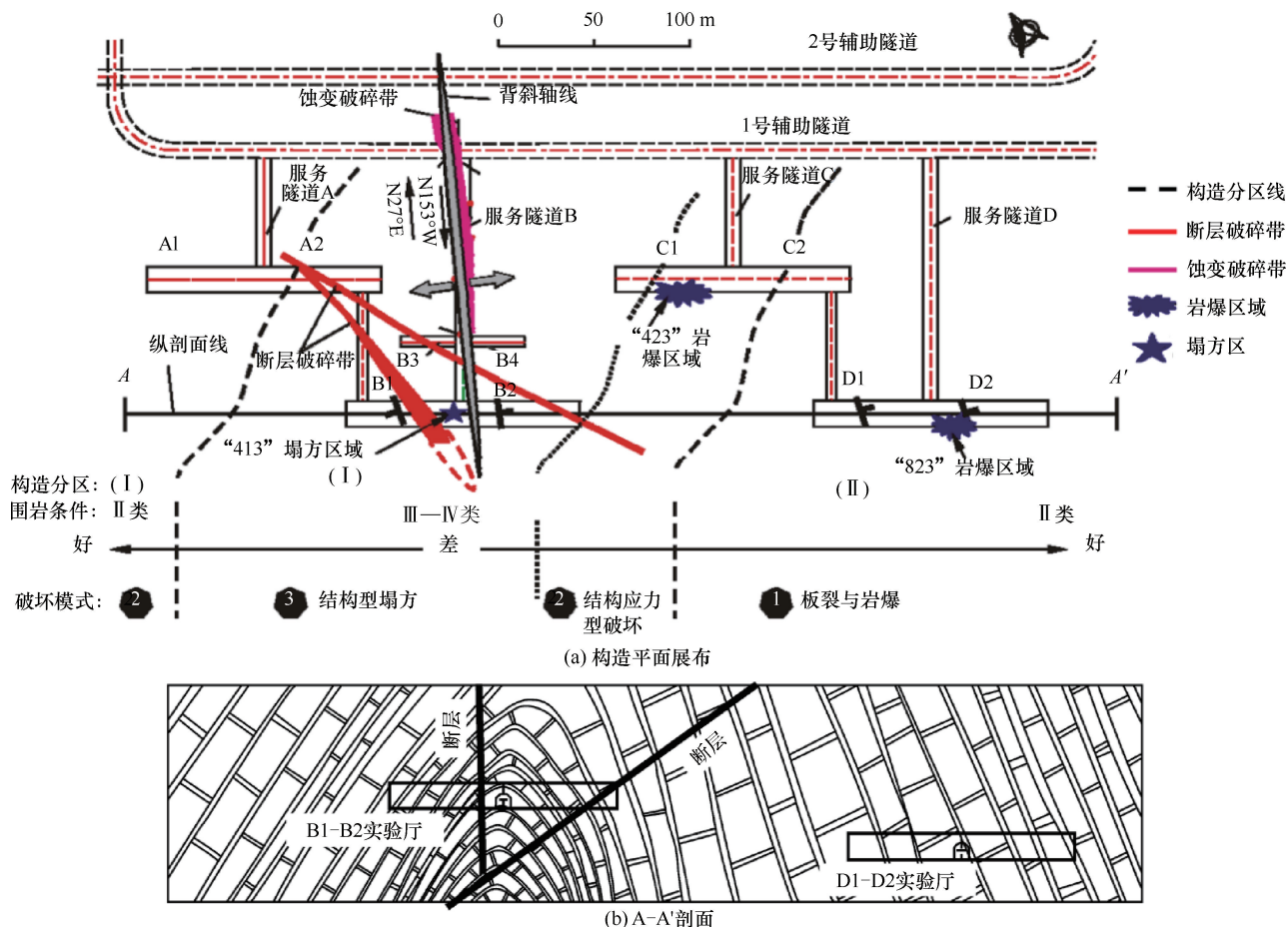


图2 锦屏地下实验室二期区域工程地质条件^[14]

Fig. 2 Geologic Conditions of the underground laboratory in Jinping II

1.2 原始辐射本底情况

锦屏地下实验室一期和二期相邻, 上覆岩体厚度相当且同属大理岩。该处大理岩天然放射性很低, 钾-40 (1.46 MeV) $< 1.1 \text{ Bq/kg}$, 镭-226 (609 keV) 为 $1.8 \pm 0.2 \text{ Bq/kg}$, 钍-232 (911 keV) $< 0.27 \text{ Bq/kg}$, 低于地表正常环境的几十分之一到几百分之一^[16]。在逾 2 400 m 厚岩石屏蔽下, 实验室宇宙线通量仅为 $(61.7 \pm 11.7) \text{ m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 约为地面宇宙线通量的亿分之一^[17], 意味着实验室每星期每平米仅约一个宇宙射线到达, 如此极低宇宙线通量下, 宇宙线瞬时所产生的本底影响几乎可以忽略^[18]。

锦屏地下实验室一期于 2010 年 12 月建成并启用, 在 2010 年 12 月至 2011 年 9 月期间, 实验室空气氡浓度在通风设施建成前、后分别为 $(101 \pm 14) \text{ Bq/m}^3$ 和 $(86 \pm 25) \text{ Bq/m}^3$, 已完全满足《地下建筑氡及其子体控制标准》(GBZ 116—2002)^[19] 要求的已建地下建筑氡浓度限值 400 Bq/m^3 标准。在通风正常时, 空气氡浓度保持在 $30 \sim 40 \text{ Bq/m}^3$, 氡浓度受季节、气温等因素影响已基本被通风的影响掩盖^[20]。同时, 已有研究发现暗物质探测实验中各类计数成果的变化趋势, 都与实验室中氡浓度呈明显的正相关^[4], 充分说明实验室空气中氡含量对暗物质探测这类超高精度观测实验有严重的干扰。为了减少氡对地下实验室精密探测实验的相关影响, 需对空气中氡含量进行控制, 甚至采用低温吸附等降氡措施。

2 方案设计

锦屏地下实验室一期洞室防水及支护结构采用传统的混凝土衬砌方式, 混凝土就近使用锦屏水电站施工材料, 对原材没有进行特殊的放射性控制, 导致实验室放射性水平相比于其他地下实验室略高^[21-22]。锦屏地下实验室二期工程建设时, 为屏蔽洞室围岩逸出的氡气, 降低建筑材料引入的额外辐射本底, 并保持较好的防水性能, 经过多次现场试验, 构建了一种集排水、防水、结构层、面层于一体且较为轻薄的防

水抑氡结构。

2.1 原材料选择

自然界中含有放射性核素的物质众多, 尤其以矿石、岩土为原料加工而成的无机建筑材料, 都含有 U 系、Th 系和 40K 等原生放射性核素。这些原生放射性核素能够放射出 γ 射线, 会对探测器产生环境辐射光子本底信号^[12], 干扰暗物质及无中微子双贝塔衰变等概率极低事件的物理探测。为此, 锦屏地下实验室二期工程防水抑氡结构全部使用极低辐射本底建材, 建材辐射本底检测委托锦屏地下实验室一期负责, 利用高纯锗 γ 谱仪测量样品中放射性核素的活度, 并与实验室围岩的天然放射性核素活度进行比较, 材料不应含有 Cs、Co 等人工放射性核素, 天然放射性核素活度浓度应在实验室围岩放射性核素活度浓度的 3 倍以内。

经过低本底实验检测, 最终选用建材均满足低辐射本底要求, 同时, 通过优化结构层, 减少了外界建材的使用量。

2.2 洞壁防水抑氡构造

防水抑氡结构主要包括排水层、防水层、结构层、面层等四大构造, 按照“以排为主、防排结合、多道设防”的原则进行设计^[23]。其施工完成形象如图 3 所示。

2.2.1 排水层

锦屏地下实验室上覆山体厚、地下水位高、渗透水压大, 渗水多顺岩层出露, 多以线状流水呈现, 局点有小股涌水, 岩层较厚区域, 也有渗滴水现象。渗出的水不仅可能直接造成仪器短路、故障, 还会改变地下实验室湿度环境, 且地下水往往含有氡, 会影响实验的测量效果和测量仪器、材料的使用寿命。为保证地下实验室环境的干燥, 需要将渗出的水及时排走。因此, 防水抑氡结构首先设置了排水层, 利用排水层及时将岩体渗水导流至地面排水沟, 将绝大部分岩壁渗水与实验室内部空间有效隔离, 这也与常用衬砌外水处理方法类似^[24]。

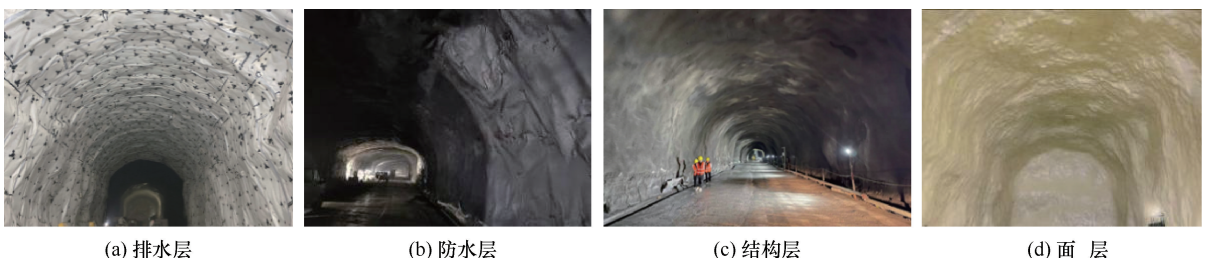


图 3 防水抑氡结构四大构造施工完成形象

Fig. 3 Construction completion of four major structures for waterproof and radon suppression structures

2.2.2 防水层

仅使用排水层进行防水仍可能从缝隙、接口处渗透出少量水,洞壁岩石中氦也可能散发出来,因此需要在排水层内侧设置严密的防水层,有效补充排水层形成系统防渗体系,将岩壁渗水与岩体释放的氦气屏蔽在实验室外,并顺流排入地面排水暗沟,然后通过排水暗沟系统将汇集的岩壁渗水及氦气引流至实验室外,从而避免了岩体渗水和氦气对实验室正常使用造成影响。

2.2.3 结构层

洞壁排水、防水层使用的是柔性高分子材料和防水涂层,这类材料在受外力时极易受损。锦屏地下实验室二期洞室跨度大、净空高,为了保证排水防水层永久安全可靠使用,需要设置一个相对刚性的承力结构层,同时也对排水防水层形成防护,并为表面的洁净装饰层提供基层。与传统地下实验室进行混凝土衬砌相比,锦屏地下实验室二期只在满足安全要求的条件下,进行了“锚杆+挂钢筋网+喷混凝土”支护,使因大量水泥等建筑材料引起的环境辐射本底增加得到了极大的控制和降低。

2.2.4 面层

锦屏地下实验室内开展的各项高精度和高灵敏度的探测实验对实验室环境洁净度有非常高的要求,洞室表面的光洁度是影响实验室洁净指标和正常运行的关键因素。因此防水抑氦结构在结构层内侧,利用多层找平材料处理原始基面,施作洁净装饰面层,最终实现洞室表面光滑、洁净,确保了相关实验可准确进行。

3 洞壁(含拱顶)防水抑氦工程技术

洞壁(含拱顶)防水抑氦结构以洞壁锚杆和膨胀螺栓为主要固定手段,先后铺设排水层、防水层、结构层、面层,最终实现了结构轻薄且效果优秀的防水抑氦结构。

3.1 结构承力点工程技术

为实现实验室洞壁(含顶拱)防水抑氦结构层的最终防治效果,必须将其固定于洞壁,现场主要依靠锚固于周边围岩的锚杆承力。锚杆间排距侧壁为2 m,拱顶为1.5 m,梅花形布置,锚杆外露长度8~10 cm。锚杆施工质量经过了抗拔力和密实度检测,其检测结果均满足抗拔力大于30 kN、密实度大于90%的设计要求,能很好地作为防水抑氦结构的承力点。

3.2 排水层工程技术

3.2.1 排水板铺设

防水抑氦排水层结构使用20 mm厚复合HDPE

凹凸排水板,幅宽2 m,两侧长边平板宽度30 cm。单幅排水板长度根据洞室横断面周长定制,以减少排水板横向搭接,降低地下水渗透的可能;排水板背侧设置无纺布,且与排水板一体成型。由于洞壁表面凹凸不平,为确保固定,需根据基面平整情况确定排水板固定点间距。排水板沿洞室轴线逐环铺设,每环一幅排水板,凸点朝向洞壁,由洞顶往两侧随锚杆、膨胀螺栓节点处理同步推进。排水板纵向搭接采用双焊缝焊接,在相邻板材间出现缺口处使用同材质平板进行缺口的补焊,尽可能保证排水板的整体性和密封性。

3.2.2 节点处理

(1)锚杆节点。锚杆是结构的建造基础,保证防水抑氦结构基本的稳定性和安全性。在固定排水板的同时,为保证锚杆节点不降低防水抑氦结构的密封性,采用聚氨酯密封胶填充排水板与锚杆间缝隙、环氧界面胶填充无纺布间隙,并于界面胶表层涂刷高粘抗滑水性橡胶沥青防水涂料,增设玻纤网格布胎体增强层,并二次涂刷防水涂料,最后使用聚氨酯密封胶密封。其处理流程和节点示意图如图4所示。胎体增强层和多层防水涂料大大加强了节点的防水、防氦的密封效果,同时并未过度增加结构重量,提高了工程的安全性。

(2)膨胀螺栓节点。膨胀螺栓主要用于补充固定锚杆节点附近的排水板,增强节点与基层固定程度,为后续的密封提供更好的条件。使用膨胀螺栓将排水板固定在基面上,固定点间距根据基面平整情况确定,顶拱为0.5~0.8 m,洞壁为1~1.5 m;基面局部凹凸明显时,在凹处加密固定点;为减少节点,在保证固定的前提下尽量放大间距。膨胀螺栓节点还增设了遇水膨胀止水环,并加涂聚氨酯防水密封胶,更进一步地保证了密封效果(见图5)。

(3)排水板搭接处理。排水板的搭接效果直接影响防水抑氦结构的完整性,因此搭接方式至关重要。排水板的搭接分为长边搭接(环向)和短边搭接(纵向)两种情况。根据相关规范并借鉴以往案例,长边搭接使用平板爬焊机施焊(双焊缝),缝宽不小于1 cm,搭接宽度不小于10 cm。而短边搭接一般发生在洞壁底部,或因洞壁凹凸严重导致排水板褶皱必须截断部位。短边搭接宽度不小于30 cm,且采用下侧排水板剔除凸点后贴于上侧排水板背侧的顺水搭接方式,大大降低了搭接缝渗水风险。搭接范围内两层排水板之间使用热风枪热熔焊接,连接所有排水板,形成一个整体,有效防止了地下水和氦气的溢出。搭

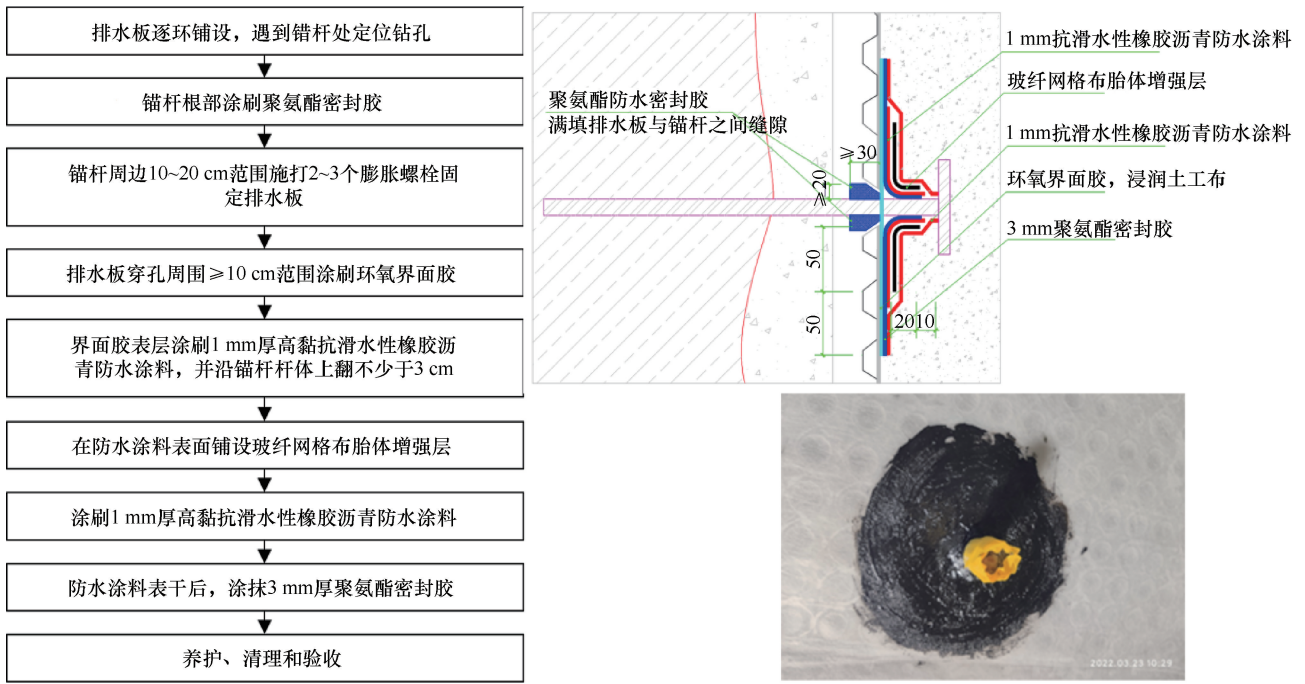


图4 排水层锚杆节点处理流程、做法示意和实物(单位: mm)

Fig. 4 Flow chart, schematic diagram of construction method, and physical diagram of anchor rod node treatment in drainage layer (Unit: mm)

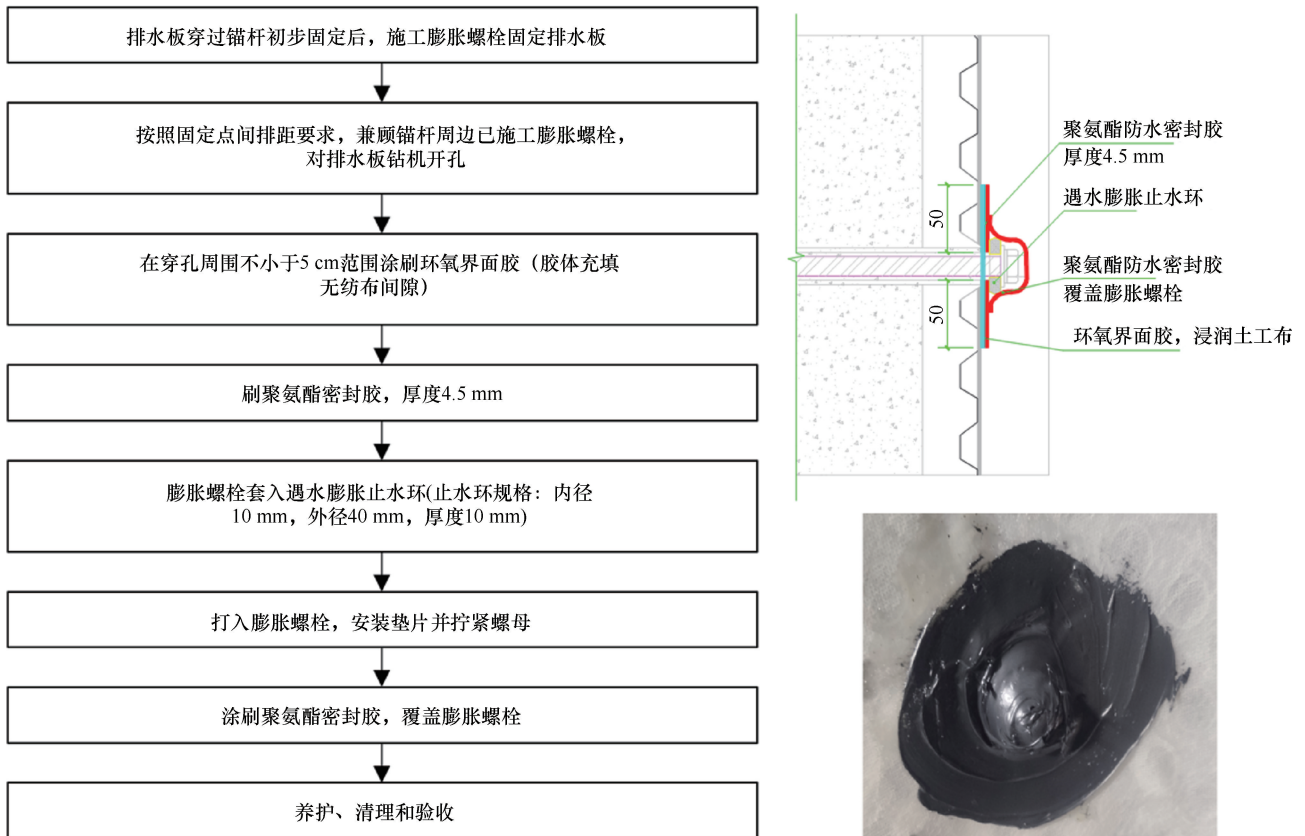


图5 膨胀螺栓节点处理流程、做法示意和实物(单位: mm)

Fig. 5 Expansion bolt node processing flowchart, schematic diagram and physical diagram (Unit: mm)

接缝外侧粘贴高分子聚乙烯丙纶自粘防水卷材, 缝两侧卷材宽度不小于 10 cm, 为保证粘贴效果, 粘贴前还需要涂刷一层环氧界面胶, 进一步保证了地下水和氦气不会渗透。焊接完成后, 经检测, 焊缝剥离强度为 6.3~8.4 N/mm, 满足剥离强度 ≥ 4 N/mm 的设计要求。

(4) 排水沟部位处理。为防止影响防水层的整体寿命, 排水层外的地下渗水需要及时排走, 通过将洞壁的排水层与洞底的排水沟相连, 并将排水沟上部密封, 确保及时排走山体渗水同时避免氦气从排水沟处进入实验空间。排水沟靠墙一侧采用膨胀螺栓对排水板进行固定, 排水沟靠路一侧采用射钉对排水板进行固定, 间距均为 0.5 m, 搭接范围为排水沟靠路一侧朝外 15 cm, 对此范围内的凸台进行剔除, 保证排水板与路面平顺搭接, 其结构示意图如图 6 所示。采用聚氨酯密封胶进行封闭处理, 并采用射钉固定于基面, 间距 ≤ 25 cm, 有效确保了排水板的密封收口。

3.3 防水层工程技术

排水层施工完成后, 水和氦气仍可能在接缝处、搭接处等渗透出来, 因此必须设置防水层进行严密防护。要在排水板表面喷涂 3 mm 厚速凝液体橡胶防水涂料形成系统防水层, 其效果如图 7 所示。

为确保施工质量, 在喷涂防水层时, 喷枪垂直于喷涂基层, 距离适中, 均匀移动, 以确保喷涂均匀。按照先细部构造后整体喷涂的顺序连续作业, 一次多遍、交叉喷涂, 最终达到设计厚度要求。在立面或坡面施工时, 喷枪按照从下向上、由低到高的方向顺序

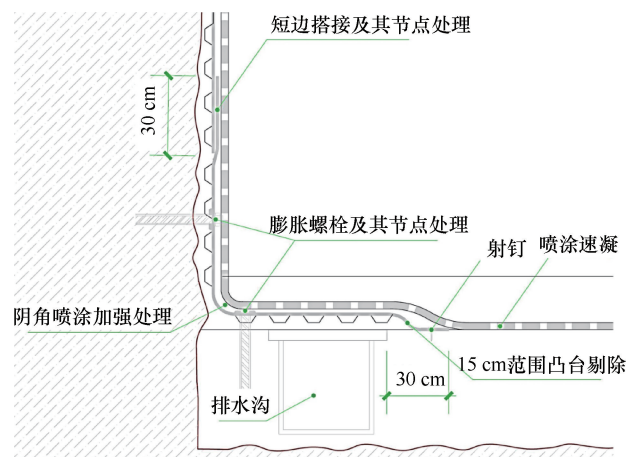


图 6 排水沟部位处理示意

Fig. 6 Schematic diagram of drainage ditch treatment

喷涂, 防止高处喷涂的防水层下滑影响低处的厚度。大面施工时, 喷涂施工分段分区完成, 防止部分区域喷涂时间间隔过长, 影响防水层效果, 且两次喷涂作业面之间的搭接宽度不应小于 100 mm。对于非平面的阴阳转角、预埋件根部、设备基础、施工缝等部位均需喷涂补强。

在现场随机切割取样和检测共计 712 点, 实测厚度为 2.9~3.8 mm, 平均 3.2 mm, 标准差 ± 0.2 mm, 满足厚度不小于 3 mm 的设计要求。

3.4 结构层工程技术

防水层施工完成后, 通过预留锚杆头挂设钢筋网, 并喷射混凝土, 以对排水防水层形成保护、为面层提供基层, 这也是整个防水抑氢整体承力结构层。

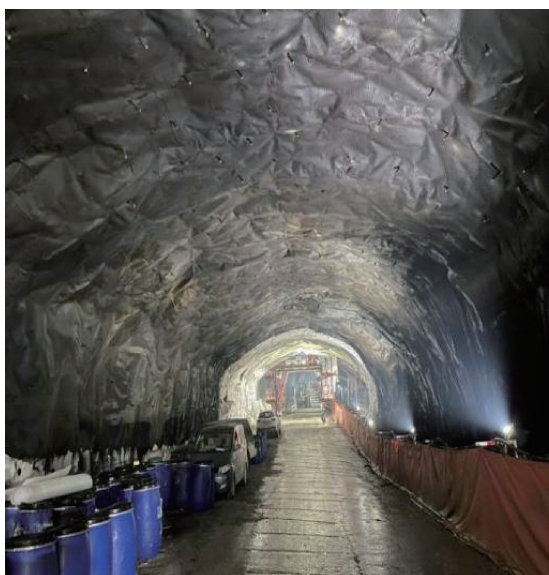
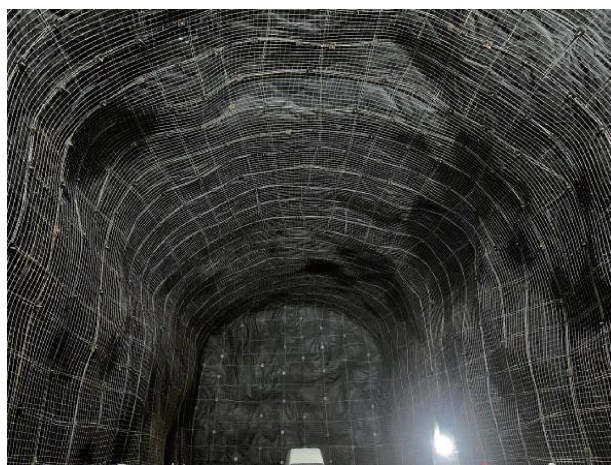


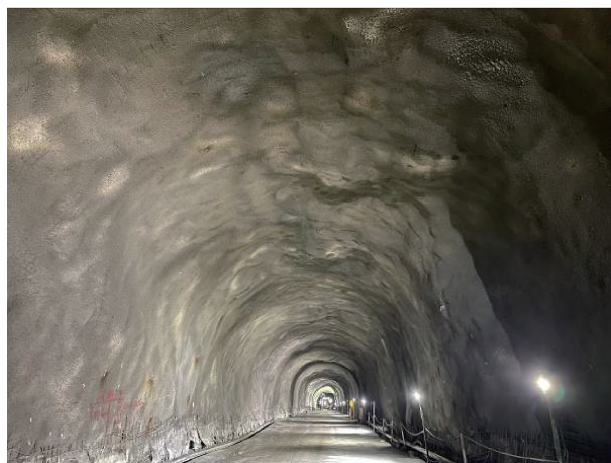
图 7 3 mm 厚速凝橡胶喷涂辅助隧道(左)和实验大厅(右)

Fig. 7 3 mm quick setting rubber spray assisted tunnel (left) and experimental hall (right)

为了有效利用预设锚杆节点, 适应洞壁凹凸起伏实际条件, 使得钢筋网尽量贴合排水板, 从而控制喷混凝土厚度, 经过多次试验, 骨架钢筋选择直径 12 mm 的 HRB400 钢筋, 环向骨架钢筋设置为双根, 与环向相邻两根锚杆连接固定; 将水平向骨架钢筋由双根布置调整为单根, 间距加密一倍(钢筋总量不变), 使骨架钢筋网格面积缩小一半, 提高了钢筋网整体刚度, 有效防止了钢筋网下坠、脱空问题, 便于控制喷混凝土层厚度。安装完骨架钢筋后在骨架钢筋外层布设钢筋网 $\phi 6@150 \times 150$ mm, 具体效果如图 8 所示。



(a) 挂钢筋网



(b) 喷射混凝土

图 8 挂钢筋网和喷射混凝土

Fig. 8 Hanging steel mesh and shotcrete

喷混凝土材料为自建拌合站生产的 C30 掺纤维素纤维混凝土, 水泥为低本底水泥, 砂石骨料在盐源县平川镇和冕宁县大桥镇筛选的低辐射骨料, 掺加纤维素纤维。通过使用低辐射骨料和纤维素纤维, 在增加了混凝土韧性的同时保持了建材的低辐射本底,

表 1 和图 9 为某个水泥试样辐射本底检测结果, 所有使用的建材辐射本底均在实验室围岩辐射本底的 3 倍以内。由于喷混凝土基底为排水防水层, 其具有柔性且保留洞壁凹凸不平形状, 喷混凝土厚度超过原设计厚度现象普遍。

表 1 水泥放射性检测结果

Table 1 Radioactivity detection results of cement

特征峰 /keV	核素名	衰变系	水泥 P. O 42.5 /Bq · kg ⁻¹	20150113-2 号洞岩石样品 /Bq · kg ⁻¹
186.11	Ra-226	U-238	43.1 ± 5.1	16.7 ± 2.0
295.21	Pb-214	U-238	7.2 ± 1.2	10.9 ± 1.2
351.92	Pb-214	U-238	23.9 ± 2.6	10.4 ± 1.1
609.32	Bi-214	U-238	12.9 ± 1.5	10.5 ± 1.1
1 120.29	Bi-214	U-238	23.7 ± 2.5	10.5 ± 1.3
1 764.49	Bi-214	U-238	22.4 ± 2.5	11.5 ± 1.4
209.30	Ac-228	Th-232	23.3 ± 2.5	0.1 ± 0.1
338.30	Ac-228	Th-232	16.9 ± 2.0	0.4 ± 0.1
583.20	Tl-208	Th-232	16.2 ± 2.1	1.6 ± 0.3
911.60	Ac-228	Th-232	19.2 ± 2.5	1.2 ± 0.2
969.10	Ac-228	Th-232	178.8 ± 19.0	1.1 ± 0.2
2 614.50	Tl-208	Th-232	20.7 ± 2.8	0.8 ± 0.2
1 460.70	K-40	K-40	68.7 ± 7.3	28.7 ± 3.3
天然放射性水平评价(²²⁶ Ra)			2.58 倍	基准

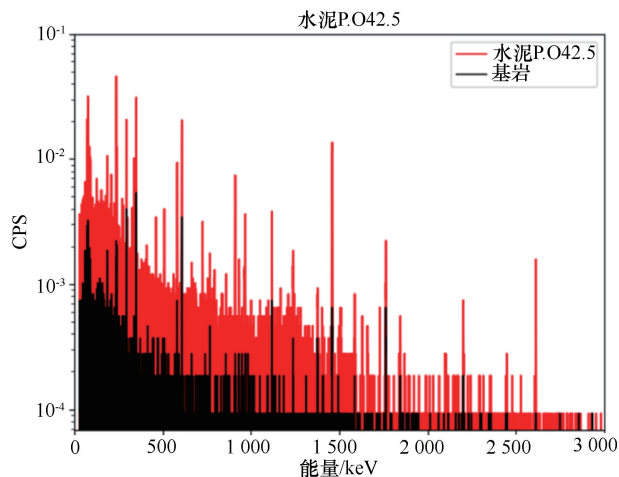


图 9 水泥低本底能谱基岩对照

Fig. 9 Comparison diagram of cement low background energy spectrum bedrock

经检测, 混凝土抗压强度均超过 30 MPa, 厚度在 8~10 cm, 无漏筋及漏喷情况, 满足设计要求。结构层能够很好地承受防水抑氡结构的重量, 为排水、防水层提供了基层, 确保了防水抑氡的效果和自身的低辐射本底。

3.5 面层工程技术

面层喷涂于结构层之上, 首先喷涂 15 mm 厚聚合物水泥砂浆、2 mm 厚聚氨酯胶泥, 逐步改善结

构层平整度和光洁度,其中喷涂聚合物水泥砂浆找平层2遍,增加砂浆喷涂次数有助于改善混凝土表面凹凸。喷涂聚合物砂浆后对表面进行逐点消缺,保证结构层表面平整度。再喷涂200 μm厚聚氨酯面漆、60 μm厚清漆,形成防水抑氢结构的面层,最终实现了岩壁表面的光洁平滑及结构层的密封,施工过程如图10所示。

3.5.1 聚合物水泥砂浆

水泥砂浆的原材料包括低辐射水泥,粒径小于3 mm的机制细砂,200目石英砂,助剂。其中助剂为粉料,主要作用是把水泥砂浆改性为聚合物水泥砂浆,增强砂浆的黏结强度和柔韧性,防止砂浆开裂,并且保证砂浆有良好的机械喷涂施工性能。聚合物水泥砂浆配合比如表2所列,使用专用砂浆搅拌机和砂浆喷射机施工,施工流程如图11所示。

表2 聚合物水泥砂浆配合比设计

Table 2 Mix design of polymer cement mortar

序号	水泥/kg	砂/kg	助剂/kg	水/kg
第一层喷涂	100	170(细砂)	20	40~45
第二层喷涂	100	170(细砂)	40	45~50
第三层喷涂	100	140(石英砂)	40	40~45

经检测,现场聚合物砂浆15 mm厚度标识全部被覆盖,结构满足设计要求。多层喷涂改善了混凝土表面,施工完成后,混凝土表面较为平整,便于后续喷涂。

3.5.2 聚氨酯胶泥

聚氨酯胶泥由A、B组份组成,配比A:B=2:1。A组份为主剂,主要组分为环氧改性聚氨酯、活性剂、流平剂、有机硅等。B组份为固化剂,主要成分为醛亚胺改性固化剂、有机硅等。聚氨酯胶泥具有良

好的强度、柔韧性和弹性,可以有效弥补混凝土的细小裂纹,平滑喷射混凝土及砂浆面层的微小凹凸,提高岩壁完成面平整度和光洁度。

施工时,先将基面打磨清理、用风机吹除表面浮灰,随后采用专用聚氨酯胶泥搅拌机拌合,使用高压无气喷涂机喷涂施工,喷嘴压力控制在0.6~0.8 MPa,喷射角度与基面垂直、距离40~70 cm,采用十字交叉、先左右后上下约2 m范围各喷射一道,当天进行第2次喷涂,间隔24 h后进行第3、4次喷涂,再间隔24 h后进行第5、6次喷涂,最后养护、清理和验收。

经检测,现场聚氨酯胶泥实测点位3 505个,厚度为1.9~2.2 mm,平均2.1 mm,标准差±0.05 mm,满足2 mm厚的设计要求,且混凝土表面光洁平整,能够达到实验室要求。

3.5.3 面漆和清漆

面漆和清漆均为水性聚氨酯漆,由A、B组份组成,配比A:B=2:1。A组份为主剂,主要原料为聚氨酯支化改性环氧树脂、颜料、流平剂、消泡剂、分散剂等,B组份为固化剂,主要原料为改性聚酰胺固化剂、改性聚醚胺固化剂等。面漆可以有效填补胶泥的微小凹凸,使整个漆面更平整光滑,提高防水抑氢结构表面平整度和光洁度。

其施工方法同聚氨酯胶泥类似,基面清理、除灰后用专用搅拌机拌合,喷涂时喷涂方式不变,压力改为0.4 MPa,且由当天进行第2次喷涂改为当天反复喷涂、保证厚度一次成型。间隔24 h后以相同的方式喷涂清漆。经检测,面漆厚度实测点位3 510个,厚度为220~250 μm,平均230 μm,标准差为±4.6 μm,满足200 μm厚的设计要求;清漆厚度实



图10 砂浆、聚氨酯胶泥、面漆/清漆施工

Fig. 10 Construction of mortar, polyurethane adhesive, topcoat/varnish



图 11 聚合物水泥砂浆施工流程

Fig. 11 Construction process of polymer cement mortar

测点位 3 510 个, 厚度为 62~80 μm, 平均 66 μm, 标准差为±1.4 μm, 满足 60 μm 厚的设计要求。

至此, 整个防水抑氡结构全部施工完成, 其中所用材料均为低辐射材料, 完成后实验室内壁光滑整洁, 完成效果如图 12 所示。

4 氡含量监测成果分析

4.1 监测仪器

监测仪器为美国 SUN NUCLEAR 1027 型连续氡测定仪, 利用扩散结光二极管探测器来测量氡气的浓度, 当含氡空气扩散进入监测仪的探测室, 氡衰变产生的 α 粒子会被光二极管所探测。监测仪器受到 US EPA 认可, 测量范围为 0.1~999 pCi/L (1 pCi/L = 37 Bq/m³), 工作温度为 7~35 ℃, 准确度为±25%或

1 pCi/L (对于大于 24 h 测量), 测量周期为 1 h (可以设置为 4 h、8h、24 h), 灵敏度在 1 pCi/L 的空气中每小时 2.5 个计数, 启动测量后自动测量两天或两天以上。

4.2 氡含量监测分析

锦屏地下实验室二期工程防水抑氡工程于 2023 年 2 月施工完成后, 为监测防水抑氡结构效果, 2024 年 3 月 5—18 日、5 月 2—10 日分别在锦屏地下实验室二期 A2 厅、D1 厅、B3 厅、辅 2 门外等四个部位开展了氡含量监测, 四个测点有通道连接, 测量点位分布如图 13 所示。

其中, A2 厅防水抑氡结构完成且已通新风, D1 厅防水抑氡结构完成但未通新风; B3 厅保留隧洞开挖完成状态、无支护和防水抑氡结构; 实验室辅 2 门外测点位于锦屏二级水电站排水隧道内, 仅有支护, 没有防水抑氡结构, 未通风, 隧道内常年排放地下渗水, 近 10 年内, 整条 17.5 km 长排水隧道枯期最小流量 2.26 m³/s, 汛期最大流量达 19.2 m³/s, B3 厅测点可模拟实验室开挖完成后地下实验室内氡含量的自然状态, 辅 2 门外测点可模拟有丰富地下渗水的实验室有支护但无防水抑氡结构的室内氡含量的状态, 各洞室的状况如表 3 所列。

表 3 各洞室基本状况统计

Table 3 Statistics of basic conditions of each cave

测量点	通风状况	防水抑氡	支 护	断裂经过	地下渗水情况
A2 厅	有	有	有	有	普 通
B3 厅	—	—	—	有	普 通
D1 厅	—	有	有	—	普 通
辅 2 门外	—	—	有	—	丰 富



图 12 防水抑氡结构完成效果

Fig. 12 Completion site of waterproof and radon suppression structure

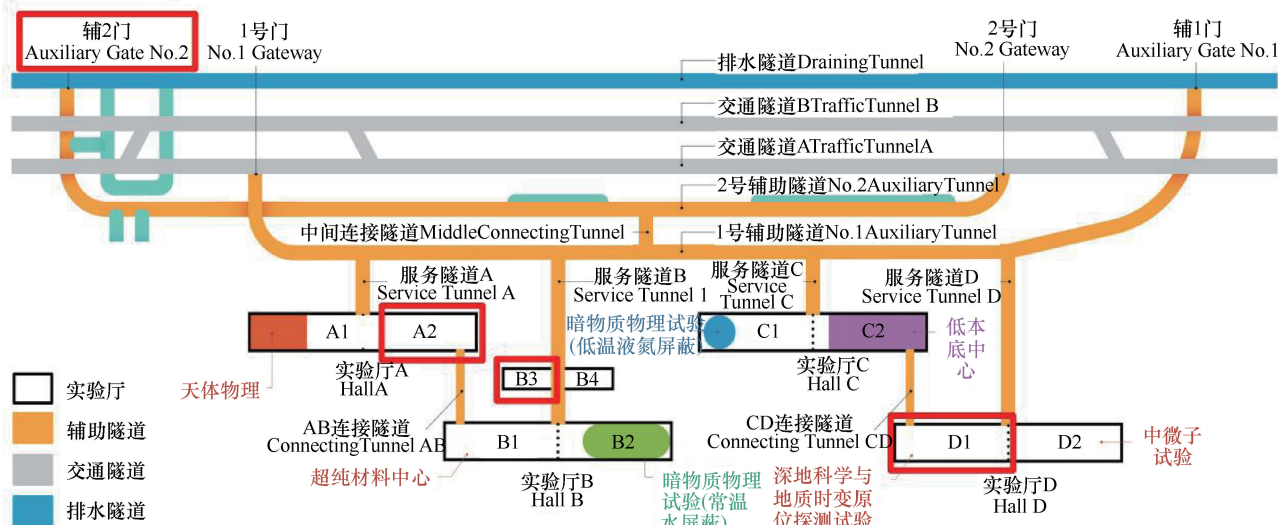


图 13 所选 4 个测量点位置分布

Fig. 13 Distribution map of the positions of the four selected measurement points

四个测量点使用同一台仪器在不同时间连续测量 48 h, 确保不会因为仪器的不同产生测量差异, 每一个小时记录一个数据点, 测量结果如图 14 所示。

根据测量数据, 可以计算出不同时间 A2 厅、B3 厅、D1 厅和辅 2 门外四个测点 48 h 氡气浓度平均值, 在图 14 中用虚线表示, 为了和锦屏地下实验室一期监测结果单位一致, 将 pCi/L 换算为 Bq/m³, 结果如表 4 所列。

表 4 不同时间所选 4 个测量点氡气浓度监测结果

Table 4 Monitoring results of radon concentration at four selected measurement points

测量点	三月测量结果 平均值 /Bq·m ⁻³	五月测量结果 平均值 /Bq·m ⁻³	总体测量结果 平均值 /Bq·m ⁻³
A2 厅	11.1 ± 18.5	11.1 ± 11.1	11.1 ± 14.8
B3 厅	77.7 ± 44.4	81.4 ± 33.3	79.6 ± 33.3
D1 厅	22.2 ± 14.8	22.2 ± 14.8	22.2 ± 18.5
辅 2 门外	107.3 ± 37.0	129.5 ± 40.7	118.4 ± 44.4

注: 1 pCi/L = 37 Bq/m³。

结合各洞室状况及测量结果可知: (1) A2 厅氡气浓度为 11.1 Bq/m³, D1 厅为 22.2 Bq/m³, 与新风系统进口空气中氡浓度接近, 远低于规范要求的地下建筑氡气浓度(400 Bq/m³), 表明防水抑氡结构的使用及通风能够很好地隔绝围岩释放的氡气, 使洞室保持较低的氡气水平。(2) 实验室二期 A2 和 D1 厅的氡浓度均远低于实验室一期通风前后的 101 Bq/m³ 和 86 Bq/m³, 对比同类型国际地下实验室其氡气浓度仍属于较好的水平^[19], 国际地下实验室氡浓度水平如表 5 所列。证明实验室二期采用低辐射建材、实施防

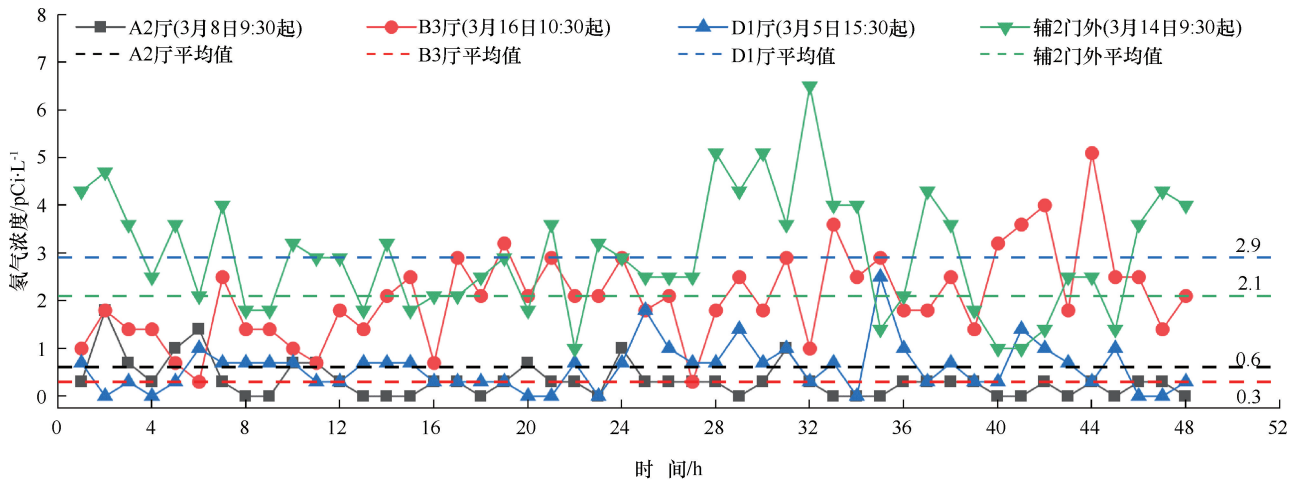
水抑氡结构降低实验空间氡浓度的做法是正确可行的。(3) 对比 D1 厅和辅 2 门外, 洞室在完成防水抑氡结构后, D1 厅氡气浓度 22.2 Bq/m³ 约为辅 2 门外的 18.75%, 显著降低了氡气浓度, 体现了防水抑氡结构降低洞室氡气浓度的有效性。(4) 在防水抑氡结构施工完成一年后, A2 厅与 D1 厅时隔两个月的氡气浓度 48 h 平均值基本保持不变, 表明防水抑氡结构是长期有效的。(5) A2 厅氡气浓度为 D1 厅的 50%, 说明通风措施能进一步降低空气氡, 使洞室保持较低的空气氡浓度水平。

表 5 国际地下实验室氡浓度水平比较

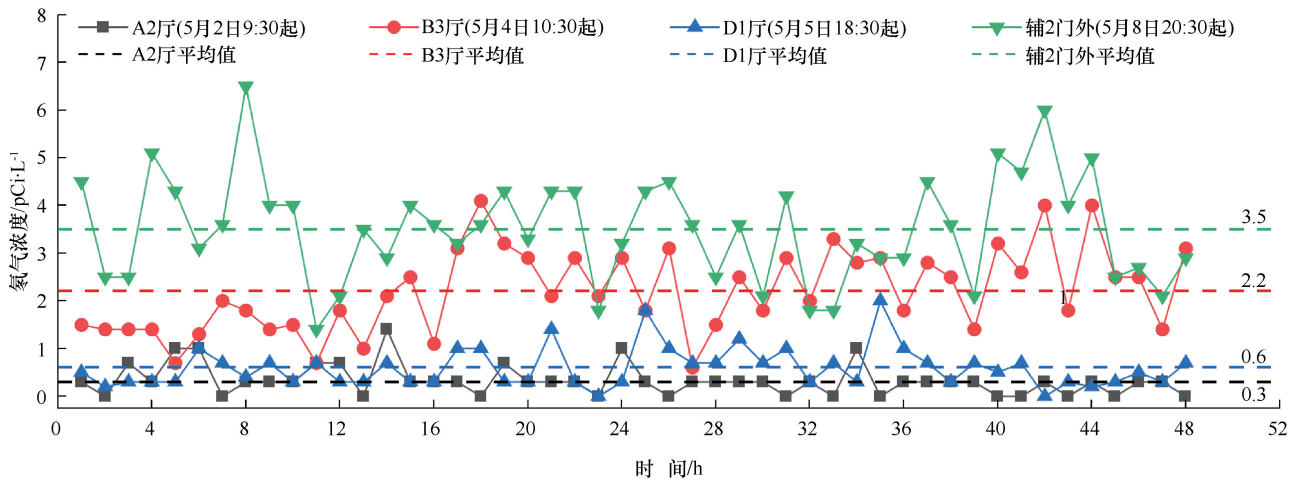
Table 5 Comparison of radon concentration levels in international underground laboratories

地下实验室	空气氡浓度/Bq·m ⁻³
Boulby ^[25-26]	2.23
Gran Sasso(A 厅、B 厅) ^[27]	~20
Gran Sasso(C 厅) ^[27]	~100
Soudan ^[28]	440.3 ± 4
Sudbury ^[29]	129.5 ± 5.9
Sanford/Homestake ^[30]	180 ~ 440
Y2L ^[31]	~44.4
CJPL-I ^[22]	86 ± 25
CJPL-II(A2 厅)	11.1 ± 14.8

经现场实测, 洞壁渗水均被防水抑氡层屏蔽在实验空间以外, 沿着实验室洞壁两侧地面排水暗沟排放至实验室辅 1 门和辅 2 门以外, 防水抑氡结构对空间氡气浓度控制和防水效果明显, 结构施工完成至今, 已历两个汛期, 目前尚未发现结构渗漏的情况。



(a) 3月5—18日四个测点不同时间测量结果



(b) 5月2—10日四个测点不同时间测量结果

图 14 不同时间所选 4 个测量点氡气浓度监测结果

Fig. 14 Monitoring results of radon concentration at four selected measurement points

5 结论

锦屏地下实验室深埋于锦屏山深部, 岩体内地下水量大, 渗水情况明显, 且从洞室围岩中产生的氡气容易在实验空间中积累, 影响前沿物理实验的探测精度和人体健康, 必须对地下洞室进行防水抑氡处理。为此, 锦屏地下实验室二期开创性地建造了一种轻薄的防水抑氡结构, 实现防水和抑氡的同时, 保持了实验室洞室外观整洁。在锦屏地下实验室的 A2 厅、B3 厅、D1 厅和辅 2 门外四个测点开展原位测试, 得出如下结论。

(1) 实验室二期 A2 和 D1 厅的氡浓度分别为 11.1 Bq/m^3 和 22.2 Bq/m^3 , 均低于实验室一期通风前后的 101 Bq/m^3 和 86 Bq/m^3 , 属同类国际实验室先进水平, 使用低本底辐射建材和防水抑氡结构可有

效降低地下实验室的氡气含量。

(2) 施工完成至今, 已历两个汛期, 目前尚未发现防水抑氡结构出现渗漏的情况。排水系统将洞室渗水充分排至实验室外, 证实了使用轻质防水层加结构层的设计方法合理有效。

(3) 在防水抑氡结构施工完成一年后, A2 厅与 D1 厅氡气浓度基本保持不变, 表明防水抑氡结构长期有效。

锦屏地下实验室作为世界上最大、最深的地下实验室, 其防水抑氡结构施工的工程量, 难度高。极深洞室群防水抑氡结构设计和施作具有开创性, 可为全球地下洞室防水抑氡工程建设提供可靠技术方法借鉴, 对深地空间实验室建设具有重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 岳骞. 我国的深地实验室 CJPL 和 CDEX 暗物质直接探测实验[J]. 现代物理知识, 2018, 30(2): 14-22.
YUE Qian. China's deep ground laboratory CJPL and CDEX dark matter direct detection experiments[J]. Modern Physics Knowledge, 2018, 30(2): 14-22.
- [2] 程建平, 李元景, 曾志. 暗物质直接探测实验辐射本底研究: 以锦屏大设施项目为例[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(7): 1-10.
CHENG Jianping, LI Yuanjing, ZENG Zhi. Research on radioactive background of dark matter direct detection experiment; Taking Jinping underground facility project as example[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(7): 1-10.
- [3] 徐鹏程, 曾志, 马豪, 等. 一种建材所致室内氡暴露剂量的矩阵评价方法[J]. 辐射防护, 2023, 43(3): 249-256.
XU Pengcheng, ZENG Zhi, MA Hao, et al. A matrix evaluation method for indoor radon exposure dose caused by building materials[J]. Radiation Protection, 2023, 43(3): 249-256.
- [4] ILIA Y, MALINOVSKY G, VASILYEV A, et al. Model of radon entry and accumulation in multi-flat energy-efficient buildings[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105444.
- [5] 张佳伟, 李淑侠, 祝宇轩, 等. CCD 暗物质实验原型装置放射性氡本底研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2020, 38(5): 151-154.
ZHANG Jiawei, LI Shuxia, ZHU Yuxuan, et al. Research on radioactive radon background of ccd dark matter experimental prototype device[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2020, 38(5): 151-154.
- [6] GIBBONS R, HASELSCHWARDT S J, KRAVITZ S, et al. Toward a neutrino-limited dark matter search with crystalline xenon[J]. Physical Review D, 2024, 109(7): L71102.
- [7] 李海, 张婉, 李鹏博. 城际铁路路活动断层勘察方法研究[J]. 铁道勘察, 2024, 50(2): 58-63.
LI Hai, ZHANG Wan, LI Pengbo. Research on the prospecting method of hidden active faults in intercity railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(2): 58-63.
- [8] ZHANG C, LI L, TAO Z, et al. Analysis method of radon release during underground cavern excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 154: 106062.
- [9] DARAKTCHIEVA Z, WASIKIEWICZ J M, HOWARTH C B, et al. Study of baseline radon levels in the context of a shale gas development[J]. Science of The Total Environment, 2021, 753: 141952.
- [10] 丁玉祥, 朱光有, 张怀顺, 等. 天然气中氡的研究进展[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(5): 754-763.
DING Yuxiang, ZHU Guangyou, ZHANG Huaishun, et al. Migration and detection of radon in natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(5): 754-763.
- [11] 孙祁, 盖文佳, 江灏, 等. 地下工程降氡技术的应用与现状[J]. 辐射防护, 2020, 40(5): 462-469.
SHUN Q, GAI W J, JIANG H, et al. Application and status of radon reduction techniques in underground facilities[J]. Radiation Protection, 2020, 40(5): 462-469.
- [12] 温伟伟, 徐荣政, 吴友朋, 等. 地下工程氡防护方法及能力研究[J]. 辐射防护, 2022, 42(1): 48-53.
WEN Weiwei, XU Rongzheng, WU Youpeng, et al. Methods and performance of radon reduction techniques in underground facilities[J]. Radiation Protection, 2022, 42(1): 48-53.
- [13] IANNI A. Review of technical features in underground laboratories[J]. International Journal of Modern Physics A, 2017, 32(30): 1743001.
- [14] 冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 649-657.
FENG Xiating, WU Shiyong, LI Shaojun, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory (CJPL-II) in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 649-657.
- [15] 李邵军, 郑民忠, 邱士利, 等. 中国锦屏地下实验室开挖隧洞灾变特征与长期原位力学响应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(8): 842-852.
LI Shaojun, ZHENG Minzhong, QIU Shili, et al. Characteristics of excavation disasters and long-term in-situ mechanical behavior of the tunnels in the China Jinping Underground Laboratory[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8): 842-852.
- [16] 程建平, 吴世勇, 岳骞等. 国际地下实验室发展综述[J]. 物理, 2011, 40(3): 149-154.
CHENG Jianping, WU Shiyong, YUE Qian, et al. A review of international underground laboratory developments[J]. Physics, 2011, 40(3): 149-154.
- [17] CHENG J P, KANG K J, LI J M, et al. The China Jinping underground laboratory and its early science[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2017, 67(1): 231-251.
- [18] 刘书魁, 岳骞. 直接探测暗物质和中国暗物质实验[J]. 物理, 2015, 44(11): 722-733.
LIU Shukui, YUE Qian. Dark matter direct detection and China dark matter experiment[J]. Physics, 2015, 44(11): 722-733.
- [19] 王起伟, 袁丽, 董娴, 等. 地下工程中氡的防治措施[J]. 暖通空调, 2013, 43(S1): 276-278.
WANG Qiwei, YUAN Li, DONG Xian, et al. Preventive measures against radon in underground works[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(S1): 276-278.
- [20] 米宇豪, 马豪, 曾志等. 中国锦屏地下实验室空气氡浓度监测(2010—2011)[J]. 中国科技论文, 2015, 10(23): 2783-2785.

- MI Yuhao, MA Hao, ZENG Zhi, et al. Monitoring of radon concentration in the air of China Jinping underground laboratory (2010—2011) [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(23): 2783-2785.
- [21] 余泽. 基于低阈值高纯锗探测器的暗光子直接探测研究[D]. 北京: 清华大学, 2022.
- SHE Ze. Direct detection of dark photon with low threshold high purity germanium detectors[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022.
- [22] 王钰锋, 刘家璇, 杨丽桃, 等. 中国锦屏地下实验室与稀有物理实验[J]. 核技术, 2023, 46(8): 170-178.
- WANG Yufeng, LIU Jiaxuan, YANG Litao, et al. Rare physical events at China Jinping underground laboratory [J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(8): 170-178.
- [23] 华北电力设计院有限公司, 凝心聚力敢为先 攻坚克难勇担当: 锦屏大设施项目设计难点和技术创新[J]. 施工企业管理, 2023, (12): 105-107.
- North China Electric Power Design Institute Co., Ltd., with unity and courage to take the lead in overcoming difficulties and taking on responsibilities: Design difficulties and technological innovation in large facility projects in Jinping [J]. Construction Enterprise Management, 2023, (12): 105-107.
- [24] 赵大洲, 梁春雨, 党雪梅, 等. 引汉济渭工程黄三段深埋长输水隧洞排水方案研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 120-125.
- ZHAO Dazhou, LIANG Chunyu, DANG Xuemei, et al. Study on drainage scheme for long deep-buried water conveyance tunnel of Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8): 120-125.
- [25] SCOVELL P R, MEEHAN E, PALING S M, et al. Ultra-low background germanium assay at the Boulby Underground Laboratory [J]. Journal of Instrumentation, 2024, 19(1): P1017.
- [26] SCOVELL P R, MEEHAN E, ARAÚJO H M, et al. Low-background gamma spectroscopy at the Boulby Underground Laboratory [J]. Astroparticle Physics, 2018, 97: 160-173.
- [27] BASSIGNANI A, BAM B, COLOMBO G, et al. Review of long term radon studies at the gran sasso underground laboratory[J]. Radiation Measurements, 1995, 25: 557-560.
- [28] ADAMSON P, ANGHEL I, BARR G, et al. Comparisons of annual modulations in MINOS with the event rate modulation in CoGeNT[J]. Physical Review D, 2013, 87(3): 32005.
- [29] LAWSON I, CLEVELAND B. Low Background Counting At SNOLAB [J]. AIP Conference ProceedingsAIP Conference Proceedings, 2011, 1338(1): 68-77.
- [30] THOMAS K J, MEI D M, HEISE J, et al. Radon Monitoring and Early Low Background Counting at the Sanford Underground Laboratory [J]. AIP Conference ProceedingsAIP Conference Proceedings, 2011, 1338(1): 81-87.
- [31] HA C, JEONG Y, KANG W, et al. Radon concentration variations at the Yangyang underground laboratory [J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 1030024.

(责任编辑 王海锋)